

ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CARGA EM FUNDAÇÕES POR ESTACAS

COMPARATIVE ANALYSIS BETWEEN METHODS FOR DETERMINING LOADING CAPACITY IN STAKE FOUNDATIONS

¹NOGUEIRA, Daniel Luiz Sasdelli; ²RODRIGUES, Gabriel Vilariço; ³RODRIGUES, André Luís de Carvalho.

^{1e2}Centro Universitário das Faculdades Integradas de Ourinhos-Unifio/FEMM

RESUMO

O solo é uma formação natural, caracterizado por várias partículas e água. A engenharia é uma das áreas de atuação que mais transforma a natureza e com o solo não é diferente. Em uma obra civil apresentam-se algumas etapas, e a inicial é a fundação. Para se ter uma excelente estrutura é preciso estudar o solo no qual será aplicado os esforços, pois, é ele que dará a sustentação a toda estrutura. Uma das formas de estudar o solo é a sondagem, e a mais utilizada no Brasil é a Standard Penetration Test (SPT). Tendo o resultado do tipo de solo do local e suas características, é possível utilizar os métodos de estudo para descobrir qual a resistência do solo aos esforços que serão solicitados na construção. Dentre os métodos existem os teóricos, empíricos e os semiempíricos. O objetivo deste trabalho é o estudo dos métodos semiempíricos, sendo apresentados 4 modelos: Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Velloso (1979) e Teixeira (1996). Os resultados obtidos foram de um solo da região de Londrina no qual a sondagem determinou uma profundidade de camada de 15,45 m e foi descoberto um solo residual do tipo solo argiloso. Após os cálculos feitos a partir deste trabalho, foi possível constatar que, para o este tipo de solo, os métodos de Velloso (1979) e Teixeira (1996) apresentaram resultados mais consistentes, no entanto, o método Décourt e Quaresma (1978) foi o que apresentou um resultado mais viável técnica e financeiramente.

Palavras-chave: Capacidade de Carga; Métodos Semiempíricos; Fundações.

ABSTRACT

Soil is a natural formation, characterized by various particles and water. Engineering is one of the areas of activity that most transforms nature and with the soil is not different. In a civil work there are some stages, and the initial one is the foundation. In order to have an excellent structure, it is necessary to study the soil on which the efforts will be deployed, as it is the one that will support the entire structure. One of the ways to study the soil is through surveys, and the most used in Brazil is the Standard Penetration Test (SPT). Having the result of the type of soil of the place and its characteristics, it is possible to use the study methods to discover the resistance of the soil to the efforts that will be requested in the construction. Among the methods there are theoretical, empirical and semi-empirical ones. The objective of this work is the study of semi-empirical methods, being presented 4 models: Aoki and Velloso (1975), Décourt and Quaresma (1978), Velloso (1979) and Teixeira (1996). The obtained results were of a soil from the region of Londrina, in which one the survey determined a layer depth of 15.45 m and it was found that the soil type was basalt, which is mainly composed of clayey soil. After the calculations made from this work, it was possible to verify that, for this type of soil, the methods of Velloso (1979) and Teixeira (1996) presented more consistent results, however, the Décourt and Quaresma (1978) method was which presented a more technically and financially viable result.

Keywords: Bearing Capacity; Semiempirical Methods; Foundations.

INTRODUÇÃO

A Engenharia Civil é uma das ciências mais antigas da humanidade. Com o passar dos séculos, as técnicas de dimensionamento utilizadas foram se

modernizando e aliadas a tecnologia, permitiram uma maior precisão na análise da relação entre a variabilidade do terreno e as solicitações de projetos.

O dimensionamento de uma fundação passa pelo processo de determinação da capacidade de carga resistida pelo solo e pela própria estrutura da fundação. Portanto deve-se levar em consideração os parâmetros do solo, conhecidos também como parâmetros de perfil geotécnico, e a análise estrutural do elemento de concreto armado.

Mesmo assim, se nota inúmeras patologias, que muitas vezes ocorrem por ter utilizado um método de determinação de capacidade de carga do solo não recomendado para o terreno em seu dimensionamento, dentre elas o recalque, que é a movimentação da estrutura em sua fundação. Ocorre pela diminuição de vazios no solo, no qual chama-se de adensamento do solo. Um caso de recalque famoso é a Torre de Pisa, ela inicialmente não foi projetada para ser inclinada, mas devido ao adensamento desigual do solo, ocorreu uma movimentação na sua fundação deixando-a inclinada.

Logo, é importante um estudo que aborde diversos métodos de estudo aplicados em um solo, para que a comparação dos resultados obtidos ajude a obter o método mais eficaz para o projeto das fundações, e nessas condições reduzir custos e ampliar a vida útil da obra.

Assim, o presente trabalho busca estudar e analisar os diferentes métodos de capacidade de carga propostos por Aoki e Velloso (1975), Décourt e Quaresma (1978), Velloso (1979), Teixeira (1996) e Alonso (1996).

MATERIAL E MÉTODOS

O local estudado está localizado no município de Londrina/PR, no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica CEEG, na Universidade Estadual de Londrina. Neste local, se realizou uma sondagem de simples reconhecimento de solo do tipo SPT (Standard Penetration Test) de acordo com a NBR 6484:2001. Segundo Teixeira, *et al* (2016), a sondagem permitiu identificar a camada de um solo oriundo de basalto, que é um solo argiloso, com 15,45m de profundidade total, atingindo camada impenetrável para o amostrador padrão. Embora seja possível determinar o nível d'água através da sondagem SPT, destaca-se que o mesmo não foi encontrado.

Este ensaio fornece a descrição das camadas atravessadas, os valores dos índices de resistência à penetração (Nspt) e as posições dos níveis d'água (Cunda, 2009), foi utilizado o perfil geotécnico com a descrição segundo Vargas (1980, 1992), que permitem a análise de solo e posterior determinação da capacidade de carga. (Tabela 01).

Os métodos de determinação da capacidade de carga em fundações são: os métodos teóricos que utilizam os parâmetros do solo, como ângulo de atrito, coesão, e peso específico do solo, métodos esses que possuem teorias clássicas propostas por Terzagui (1943), e Vesic (1972); métodos empíricos, que consistem na observação do próprio fenômeno da execução da estaca para se obter informações, e executar outras escavações para constatação e enumeração das variáveis do método. Porém, para estacas escavadas, contudo, considerando os custos elevados envolvidos na execução de ensaios de prova de carga em verdadeira grandeza e a grande variabilidade da resistência dos solos em comparação às suas propriedades físicas, o procedimento puramente empírico torna-se praticamente inviável. (AMANN, 2010 p. 63); e os métodos semiempíricos, onde se usou por base os métodos teóricos e relacionou-se com as propriedades geotécnicas obtidas nas sondagens, pois como geralmente o solo é o material menos resistente, a carga da fundação está condicionada às características geotécnicas finais do maciço que envolve a estaca (LOBO, 2005).

Tabela 1 – Resultado do ensaio SPT de acordo com Teixeira, *et al* (2016).

Profundidade (m)	Nspt	Descrição do subsolo
1	3	
2	1	
3	3	
4	4	
5	4	
6	5	
7	4	Argila Siltosa
8	5	
9	6	
10	8	
11	9	
12	12	
13	10	
14	15	
15	14	Silte Argiloso
15,45	24	Rocha alterada (impenetrável ao amostrador padrão)

A presente pesquisa busca aplicar diversos métodos semiempíricos de determinação de capacidade de carga no solo estudado pela sondagem SPT, e compará-los. Sendo que a estaca considerada foi do tipo escavada, sem revestimento, muito utilizada em obras onde não há nível d'água com diâmetro 25,00 cm, característico de obras de grande e pequeno porte, com camada de assentamento em 15,00 metros e com função estrutural de compressão.

Método de Aoki e Velloso (1975)

O método de Aoki-Velloso (1975) foi elaborado a partir de método empíricos utilizados na empresa Franki S.A, por volta da década de 1960 (AMANN, 2010 p. 67). Deve-se utilizar para o cálculo, coeficiente de conversão α e k e coeficientes de proporcionalidade F_1 e F_2 , todos dispostos na Tabela 02.

Para o cálculo da resistência lateral r_l entre a estaca e o solo, de cada uma das camadas, expressa pela Eq. 01:

$$r_l = \frac{U}{F_2} \cdot \sum_1^n \alpha \cdot k \cdot N_l \cdot \Delta_l \quad (01)$$

A resistência de ponta da cota r_p de apoio da estaca é dada pela Eq. 02:

$$r_p = \frac{k \cdot N_p}{F_1} \cdot A_p \quad (02)$$

A capacidade de carga da estaca é dada pela Eq. 03:

$$R = r_p + r_l \quad (03)$$

Sendo, N_l é o índice de resistência N_{SPT} de penetração ao longo do fuste da estaca; N_p é índice de resistência a penetração N_{SPT} referente a camada de apoio da estaca; Δ_l é o trecho em metros onde r_l é constante; A_p é a área da seção transversal da estaca na cota de apoio; e U é o perímetro da seção transversal da estaca na cota de apoio.

Método Décourt e Quaresma (1978)

O método Décourt e Quaresma (1978), veio do desejo de tornar práticas as proposições teóricas de Vésic, pesquisador que o incentivou à publicação do método após anos de aplicação e constante verificação (AMANN, 2010 p. 70). Deve utilizar para o cálculo um coeficiente k e β na parcela de resistência lateral r_l , e o coeficiente α na parcela de resistência de ponta r_p , todos dispostos na Tabela 02.

Para o cálculo da resistência lateral r_l entre a estaca e o solo, utiliza-se o N_{spt} obtido ao longo de todo o fuste da estaca expressa pela Eq. 04:

$$r_l = \beta \cdot U \cdot \Delta_l \cdot 10 \cdot \left(\frac{N_l}{3} + 1 \right) \quad (04)$$

A resistência de ponta da cota r_p de apoio da estaca é dada pela Eq. 05:

$$r_p = \alpha \cdot k \cdot A_p \cdot N_p \quad (05)$$

A capacidade de carga da estaca é dada pela Eq. 06:

$$R = r_p + r_l \quad (06)$$

Sendo, N_l é a média de N_{SPT} referente a camada de solo de todo o fuste da estaca, sem levar em conta o tipo de solo; N_p é a média de N_{SPT} referente a camada de apoio da estaca, uma camada superior, e uma inferior; Δ_l é o trecho em metros onde r_l é constante; U é o perímetro da seção transversal da estaca na cota de apoio; e A_l é a área do fuste da estaca.

Método Velloso (1979)

No método de Pedro Paulo Costa Velloso (1979) o problema da estimativa do comprimento de fundações profundas é feito com base em sondagens de reconhecimento à percussão, através do valor do N_{SPT} do ensaio SPT (CRUZ, BOTTINO, COELHO, 2006 p. 43). Velloso (1979) adicionou coeficientes de correlação α_l e α_p para resistência lateral e para resistência de ponta, os

coeficientes de correlação λ_l e λ_p para os esforços de compressão e tração, e também, referente ao tipo de solo, as correlações C_l e C_p , todos dispostos na Tabela 02.

Para o cálculo da resistência lateral r_l entre a estaca e o solo, de cada uma das camadas de solo, expressa pela Eq. 07:

$$r_l = \alpha_l \cdot \lambda_l \cdot U \cdot \sum_1^n (C_l \cdot N_l \cdot \Delta_l) \quad (07)$$

A resistência de ponta da cota r_p de apoio da estaca é dada pela Eq. 08:

$$r_p = \alpha_p \cdot \lambda_p \cdot \beta \cdot A_p \cdot 0,50 \cdot [(C_p \cdot N) \textit{ acima} + (C_p \cdot N) \textit{ abaixo}] \quad (08)$$

Ainda segundo o método de Velloso (1979), deve-se considerar:

- a) $\beta = 1,016 - 0,016$;
- b) $(C_p \cdot N) \textit{ acima}$ = média dos valores $(C_p \cdot N)$ referente ao intervalo de 8 vezes o diâmetro da estaca, acima da ponta da estaca;
- c) $(C_p \cdot N) \textit{ abaixo}$ = média dos valores $(C_p \cdot N)$ referente ao intervalo de 3,5 vezes o diâmetro da estaca, abaixo da ponta da estaca;
- d) Utilizar $N_{SPT} = 40$, quando o $N_{SPT} > 40$.

A capacidade de carga da estaca é dada pela Eq. 09:

$$R = r_p + r_l \quad (09)$$

Sendo, A_p é a área da seção transversal da estaca; U é o perímetro da estaca; N_l é a média de N_{SPT} referente a camada de apoio da estaca e Δ_l é o trecho em metros onde r_l é constante.

Método Teixeira (1996)

Teixeira (1996) teve como base para a formulação de seu método os estudos desenvolvidos por Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978). O autor adotou parâmetros de correção α e β , todos dispostos na Tabela 02 e aplicados à resistência de ponta e à resistência lateral da estaca.

Para o cálculo da resistência lateral r_l entre a estaca e o solo, utiliza-se o N_{spt} obtido ao longo de todo o fuste da estaca, expressa pela Eq. 10:

$$r_l = U \cdot \beta \cdot N_l \quad (10)$$

A resistência de ponta da cota r_p de apoio da estaca é dada pela Eq. 11:

$$r_p = A_p \cdot 0,50 \cdot [(\alpha \cdot N) \text{ acima} + (\alpha \cdot N) \text{ abaixo}] \quad (11)$$

Sendo, A_p é a área da ponta da estaca; U é o perímetro da estaca; e N_l é o somatório de todo o N_{spt} obtido ao longo do fuste da estaca.

Ainda segundo o método de Teixeira (1996), deve-se considerar:

- a) $(\alpha \cdot N) \text{ acima}$ = média dos valores $(\alpha \cdot N)$ referente ao intervalo de 4 vezes o diâmetro da estaca, acima da ponta da estaca;
- c) $(\alpha \cdot N) \text{ abaixo}$ = média dos valores $(\alpha \cdot N)$ referente ao intervalo de 1 vezes o diâmetro da estaca, abaixo da ponta da estaca;
- d) Utilizar $N_{spt} = 40$, quando o $N_{spt} > 40$ e utilizar $N_{spt} = 4$, se o $N_{spt} > 4$.

A capacidade de carga da estaca é dada pela Eq. 12:

$$R = r_p + r_l \quad (12)$$

Sendo, N_l é a média de N_{spt} referente a camada de solo de todo o fuste da estaca, sem levar em conta o tipo de solo; A_p é a área da seção transversal da

estaca na cota de apoio e U é o perímetro da seção transversal da estaca na cota de apoio.

Tabela 2 – Coeficientes e correlações recomendados pelos autores de cada método.

Prof. (m)	Aoki e Velloso (1975)				Décourt e Quaresma (1978)			Velloso (1979)						Teixeira (1996)	
	K (kPA)	α (%)	F1	F2	K (kPA)	α	β	α_l	α_p	λ_l	λ_p	C_l	C_p	α (kPA)	β (kPA)
1	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
2	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
3	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
4	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
5	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
6	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
7	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
8	220	4,00	3,0	6,0	120	0,85	0,85	0,5	0,5	1,0	1,0	6,3	25	110	4,00
9	220	4,00	0	0	120	0,85	0,85	0	0	0	0	6,3	25	110	
10	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
11	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
12	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
13	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
14	220	4,00			120	0,85	0,85					6,3	25	110	
15	230	3,40			200	0,60	0,65					0,7	30	160	

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A capacidade de carga do solo foi calculada metro a metro, e obtida essa resistência, é também calculada a carga admissível (Eq. 13), cujo fator de segurança indicado na norma NBR 6122:2019, para resistência determinada por métodos semiempíricos, é 2,00.

$$Q_{adm} = \frac{R}{2,0} \quad (13)$$

O resultado obtido da carga admissível no solo e também a média da carga para fins de comparação encontra-se na Tabela 3. Cada método alcançou uma carga notavelmente diferente, sendo que o método que determinou a menor e maior carga admissível são, respectivamente, o método de Aoki e Velloso (1975) e Décourt e Quaresma (1978).

Tabela 3 – Carga admissível no solo (kN).

Carga admissível no solo (kN)					
Prof. (m)	Aoki e Velloso (1975)	Décourt e Quaresma (1978)	Velloso (1979)	Teixeira (1996)	Média
1	1,73	6,68	3,71	6,28	4,60
2	2,30	11,13	4,95	12,57	7,74
3	4,03	17,80	8,66	18,85	12,34
4	6,34	25,59	13,61	25,13	17,67
5	8,64	33,38	18,55	31,42	23,00
6	11,52	42,28	24,74	37,96	29,12
7	13,82	50,07	29,69	44,47	34,51
8	16,70	58,97	35,87	51,14	40,67
9	20,16	68,98	43,29	58,12	47,64
10	24,77	81,22	53,19	65,66	56,21
11	29,95	94,57	64,32	73,80	65,66
12	36,86	111,26	79,17	82,83	77,53
13	42,62	125,73	91,54	92,38	88,07
14	51,26	145,75	110,09	102,93	102,51
15	84,77	200,55	148,83	152,71	146,71

O estudo realizado tem a sua principal finalidade saber qual método é mais viável economicamente para o solo do tipo argiloso da região estudada, como pode-se observar no Gráfico 1:

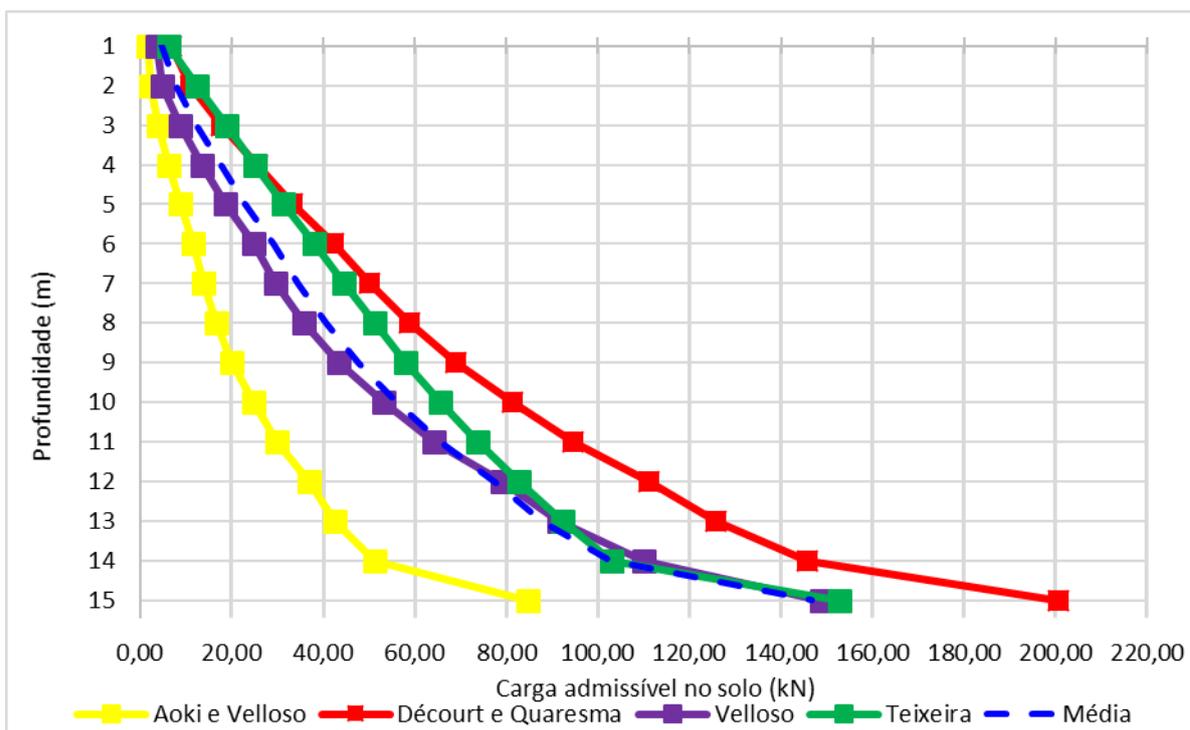


Gráfico 1 – Carga admissível no solo (kN) x Profundidade (m).

Conforme o Gráfico 1 tem-se que o método de Velloso (1979) e de Teixeira (1996), são os mais consistentes, pois apresentam valores próximos da média, e próximos entre si. Sendo assim, após as realizações dos cálculos pode-se observar que para o solo da região do município de Londrina/PR, no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica CEEG, na Universidade Estadual de Londrina, o método mais viável tecnicamente e financeiramente é o de Décourt e Quaresma (1978) que apresentou a maior resistência dentre os que foram estudados que apresentou, pois com uma estimativa maior para resistência do solo, a fundação poderá obter a resistência necessária para a edificação em horizontes menos profundos, implicando em menores custos financeiros e maior segurança.

Contudo, mesmo com os resultados apresentados, deve-se estudar o solo cuidadosamente, pois há grande variabilidade em propriedades geotécnicas, níveis d'água, resistências, etc., e tomando por base as características do solo, deve-se escolher o método que melhor atenda o projeto a ser executado.

CONCLUSÃO

Após a realização deste estudo sobre os métodos, foi possível identificar que o Decourt e Quaresma (1978) é o método que apresentou maior viabilidade para o solo argiloso encontrado na região da cidade de Londrina/PR.

Através deste estudo também foi analisado que para não se ter um gasto exagerado nas etapa de fundação de uma obra civil, e não ter problemas futuros, é necessário fazer o diagnóstico correto do solo, através da sondagem de solo, e métodos dos métodos de dimensionamentos da capacidade de carga, assim evitando custos excessivos e a diminuição da vida útil da obra.

REFERÊNCIAS

- AMANN, K. A. P. **Metodologia semiempírica unificada para a estimativa da capacidade de carga de estacas**. 2010. 383 p. Tese (Doutorado). Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo - Sondagem de simples reconhecimento com SPT: método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações** . Rio de Janeiro, 2019.
- CINTRA, Jose Carlos A.; AOKI, Nelson. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. 1 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- CRUZ, F. V. A. S., BOTTINO, C. E., COELHO, A. S. Métodos diretos para cálculo de capacidade de carga de fundações especiais – Microestacas. **Fundações & Obras Geotécnicas**. São Paulo, nº 71, p. 38-51, Agosto 2016.
- CUNDA, A. V. **Otimização de Custos em Projetos de Fundação do Tipo Sapata em Função das Propriedades dos Solos**. 2009. Trabalho de Diplomação (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- LOBO, B. O. **Método de previsão de capacidade de carga de estacas: aplicação dos conceitos de energia do ensaio SPT**. 2005. 113 p. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS.